

Surface mass-point model による月重力異常図の作成

Lunar gravity anomaly map from surface mass-point model

菅野 貴之 ^{*1}, 日置 幸介 ^{*2}

T. Sugano ^{*1}, K. Heki ^{*2}

^{*1} 京都大学大学院理学研究科, Graduate School of Science, Kyoto University

^{*2} 北海道大学大学院理学研究科, Graduate school of Science, Hokkaido University

Email: sugano@miz.nao.ac.jp ^{*1}

Abstract:

Conventional method of spherical harmonic expansion of gravity field is less successful for the Moon because of farside gravity data gap. In this study, we processed line-of-sight acceleration data of the Lunar Prospector extended low-altitude mission by using surface mass-point model to obtain gravity anomaly map of the lunar nearside. The resolution of the map is as high as 24 km x 24 km resolution which equivalent to 225th degree/order of spherical harmonics without spurious signatures than past studies.

1. はじめに

惑星・衛星の重力データは、それらを周回する人工衛星の出す電波のドップラ観測から得られる。しかし月は、地球に対して常に同じ面を向けているため、月の裏側での重力観測はまだ行われていない。一般に、惑星・衛星の重力について議論する際、重力場ポテンシャルを球関数展開した重力場モデルが用いられる。この球関数展開係数は全球的に決める必要があるが、月の場合、裏側での重力データの欠損を補うために、人為的な拘束条件（例えば Kaula の法則 [1]）を必要とし、しかもその取り方はモデルによって異なるという任意性を孕んでいる。

月探査機 Lunar Prospector (LP) は、1998 年 1 月 6 日に打ち上げられた [2]。その後、高度 100km の月周回極軌道に投入され、1 年間に渡り観測を行なった。それに加え、最後の半年間は高度を平均 30km にまで下げた低高度延長ミッションを行い、詳細な重力観測を行った。Konopliv et al. [2001] は、LP 低高度延長ミッションで得られたデータを含む、それまでのすべての月重力データ (Lunar Orbiter I-V、Apollo 15 and 16 sub-satellites, Clementine) を用いて、165 次の重力場モデルを作成した (LP165P)。しかし、裏側での重力データの欠損により、LP165P は高次でノイズが大きくなってしまいう問題があった。結果として、165 次のうち、ノイズが少なく、月科学的な目的に使えるのは、表側で 110 次 (月表面で約 50km の解像度) まで、裏側で 60 次 (同じく約 90km) までであった [3]。

このような状況の中、Sugano and Heki [2004] は、LP の視線方向加速度 (line-of-sight acceleration; LOSA) データを解析し、詳細な月重力異常図を作成した。ここではその概要を示す。

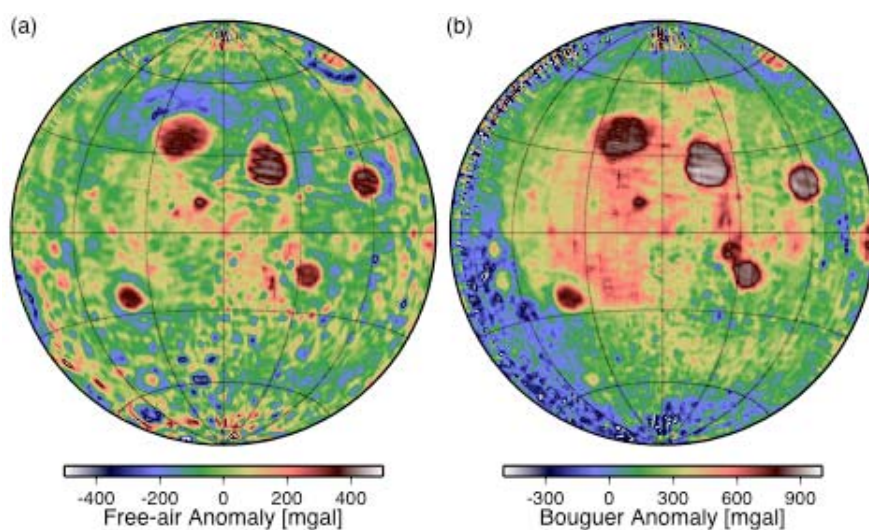


図1 LP LOSA から求めた (a) free-air 重力異常と (b) Bouguer 重力異常。

2. LP LOSA データ

LP LOSA データは、NASA Planetary Data System (PDS) の Geosciences Node で公開されている (<http://wwpds.wustl.edu>)。現在、主ミッション(1998年1月13日～1998年7月1日、1998年7月1日～1998年12月19日)と延長ミッション(1998年12月19日～1999年7月30日)のデータが入手可能である。

LOSA データは次のような処理を経て得られている(詳細は Simpson [1999] 参照)。

1. 観測された Doppler 速度から、重力場モデル(LP100J)による速度を差し引く。
2. その残差を Spline 関数で補間する。
3. 2を時間微分することで残差加速度を得る。
4. 残差加速度に LP100J から求めた加速度を加える。

LOSA データは ASCII ファイルで、1 アークごとに分割されている。それぞれのファイルの内容は、3つの部分に分けられる。始めの部分では、月の半径、GM、観測の元期、探査機の位置・速度ベクトル、月中心座標系での地球の緯度・経度など、LOSA を求める際にソフトウェアで使われた入力パラメータが与えられている。次の部分では、Doppler 速度から LOSA を求める時に用いた Spline 関数の時間間隔が、そして最後の部分では、観測時刻、探査機高度、月中心座標系での探査機の緯度・経度、残差加速度、LP100J から求めた加速度などが与えられている。このうち、探査機の LOSA は、残差加速度に LP100J から求めた加速度を加えることで得られる。

3. Surface mass-point model を用いた LP LOSA データの解析

LOSA データの解析において、我々は surface mass-point model (表面質点モデル) を用いた。このモデルでは、重力異常を引き起こす質点が半径 1738km (月半径) の球殻の表面に分布しているものと近似する。その表面を $20^\circ \times 20^\circ$ (600km 四方) の大ブロックに区切り、さらにその中を $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ (24km 四方) の小ブロックに分割する。それぞれの小ブロックの中心に質点があるものと仮定する。探査機位置で

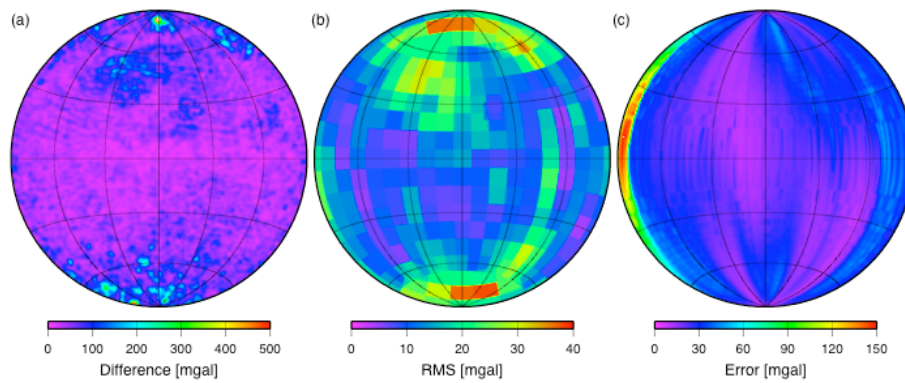


図2 (a) LP165P から求めた重力異常との差、(b) パラメータ推定での残差 RMS、および (c) 誤差

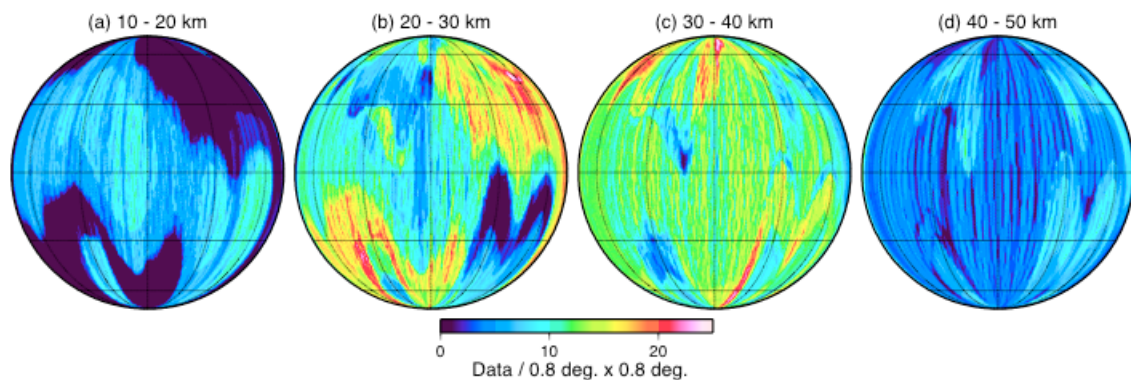


図3 様々な高度での LOSA データ密度。

の重力異常は、各々の表面質点から探査機に働く引力の総和であるとし、観測された LOSA を説明する質量分布を最小二乗推定する。各々の質点により探査機に働く引力は、Newton の万有引力の法則を用いて計算した。大ブロックの中に含まれる小ブロックの数は、最大で 625 個で、小ブロックの大きさを一定に保つため、緯度によりその数を調節している。

物体に働く引力は距離の二乗に反比例して減衰するため、重力場のより細かい構造を見るには、より低高度で得られたデータを用いる方が良い。そこで、本研究では低高度で観測が行われた延長ミッションの LOSA データを使用した。

4. LP LOSA データから求めた重力異常図

求めた表面質量は、 $2\pi G$ を掛けることで月表面での重力異常に変換できる [6]。得られた重力異常は free-air 重力異常に相当する(図 1a)。この重力異常図の解像度は 24km(小ブロックの大きさ)で、LP165P の月表側での解像度(50km)に比べて大幅に改善した。

次に、地形データを用いて LOSA データに地形補正を施した。地形データとして、月探査機 Clementine のレーザー高度計により得られた $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ グリッド地形データを用いた。また、地殻の密度は $2,900 \text{ kg m}^{-3}$ と仮定した。探査機に働く地形による引力を計算し、それを視線方向に射影する。これを LOSA データから差し引くことで、LOSA データに直接的に地形補正を施す。この地形補正された LOSA

データを前述の free-air 重力異常を求めた時と同様の処理をすることで、地形補正された重力異常を得る (図 1b)。この地形補正された重力異常は、主に地下の密度構造を反映しており、地球の重力研究における Bouguer 重力異常に相当するものである。

図 2a-c に LP165P から求めた重力異常との差の絶対値、最小二乗推定での残差 RMS、および誤差を示した。図 2a では、東西方向に走る縞模様が見られる。これは、LP165P から重力異常を求める際に、高次項を含めたことによって生じたノイズが原因である。LP165P との差と残差 RMS が、極域で比較的大きな値を示している (図 2a, b)。極付近では、探査機から観測局の電波が経路として、探査機から直接来るものだけでなく、月の表面で反射されて来るものもあるという、マルチパスという現象が発生する。LP165P を求める際には、このようなスプリアスな信号は除去されているが[3]、本研究ではそのような処理は行っていない。誤差を見てみると、西経 90° 付近で誤差が大きい (図 2c)。重力異常図 (図 1) では、この領域でスプリアスなシグナルが見られる。これは、LOSA データの分布が一様ではなく、偏りがあることが原因として考えられる。図 3 に様々な高度でのデータ密度をプロットした。これを見ると、西経 90° では、高度 40km 以上のデータが多いことが分かる (図 3d)。このような部分では、月科学的な解析に用いる際には注意を要する。

5. まとめと今後の課題

ここでは、LP 低高度延長ミッションで得られた LOSA データを、surface mass-point model を用いて解析し、月表側の重力異常を求める方法を示した。得られた重力異常図の解像度は 24km で、従来の球関数係数を用いる方法に比べて飛躍的に向上した。ただし、探査機の出す電波のマルチパス現象や探査機高度の非一様な分布から、極域および西経 90° 付近では、スプリアスなシグナルが見られた。

ここで用いた方法は、探査機の位置と視線加速度から重力異常を推定できるため、他の探査機にも応用できると考えられる。今後は、地球重力観測衛星 GRACE のデータ解析にこの方法を応用する。

参考文献

- [1] W. M. Kaula, “The investigation of the gravitational fields of the moon and planets with artificial satellites”, *Advan. Space Sci. Technol.*, 5, 210–230, 1963.
- [2] A. B. Binder, “Lunar prospector: Overview”, *Science*, 281, 1475–1476, 1998.
- [3] A. S. Konopliv, S. W. Asmar, E. Carranza, W. L. Sjogren, and D. N. Yuan, “Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission”, *Icarus*, 150, 1–18, 2001.
- [4] T. Sugano and K. Heki, “High resolution lunar gravity anomaly map from the lunar prospector line-of-sight acceleration data”, *Earth Planet Space*, 56, 81–86, 2004.
- [5] R. A. Simpson, “Software Interface Specification for the Line of Sight Acceleration Profile Data Record (LOSAPDR)”, 1999.
- [6] G. D. Garland, “The Earth’s Shape and Gravity”, Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford, UK, 1965.